

УДК 621.793.16

DOI:10.36845/2073-8250-2021-260-1-20-33

РЕЗУЛЬТАТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ИОНАМИ ПЛАЗМЫ АЗОТА ГЕТЕРОСТРУКТУР ALGAN/GAN ПЕРЕД ОСАЖДЕНИЕМ НА НИХ ЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ SiN_x МЕТОДОМ PECVD

С.В. Миннебаев, Л.А. Сейдман

АО «НПП «Пульсар», 105187, Москва, Окружной проезд, 27, Россия

Исследован процесс осаждения методом PECVD диэлектрических защитных покрытий из SiN_x на структуры AlGaIn/GaN. Осаждение плёнок SiN_x проводили в установке Plasmalab System 100 ICP180, достоинством которой является наличие источника ICP, дающего возможность формировать плазму высокой плотности и использовать в качестве одного из прекурсоров азот вместо аммиака, что снижает концентрацию водорода в плёнке. В отличие от подавляющего числа предыдущих работ здесь осаждение пленок SiN_x вели с предварительной обработкой подложки AlGaIn/GaN в плазме азота, чтобы определить степень ее влияния на параметры получаемых HEMT структур и выявить способы управления их свойствами, в частности, положением их C-V характеристик и параметрами проводящего канала.

Ключевые слова: *гетероструктура AlGaIn/GaN, защитное покрытие, плёнки SiN_x, донорно подобные ловушки, поверхностные состояния, C-V характеристики, сдвиг C-V характеристик, проводящий канал в структурах HEMT, слои сопротивление канала*

Сведения об авторах: *Сейдман Лев Александрович, к.т.н., seid1@yandex.ru; Миннебаев Станислав Вадимович*

EFFECTS OF THE PRELIMINARY NITROGEN PLASMA ION TREATMENT ON THE PECVD SiN_x PASSIVATION OF ALGAN/GAN HETEROSTRUCTURES

S. V. Minnebaev, L. A. Seidman

S&PE Pulsar JSC, 105187, Moscow, Okruzhnoy pr., 27

In this paper we investigate the process of PECVD SiN_x passivation of AlGaIn/GaN structures. The deposition of SiN_x films was carried out in a Plasmalab System 100 ICP180 featuring an ICP source, which makes it possible to make high-density plasma and use nitrogen instead of ammonia as one of the precursors, which reduces the hydrogen concentration in the film. In contrast to the vast number of previous studies, we carried out the deposition of SiN_x films with preliminary treatment of the AlGaIn/GaN substrate in nitrogen plasma in order to determine the degree of influence of such treatment on the parameters of the obtained HEMT structures and to identify ways to control their properties, in particular, CV-characteristics and parameters of the conducting channel.

Keywords: *AlGaIn/GaN heterostructure, passivation, SiN_x films, donor-like traps, surface states, CV characteristics, CV shift, HEMT channel, layer resistance*

Data on authors: *Seidman Lev Aleksandrovich, Ph.D., Leading Researcher; seid1@yandex.ru, Minnebaev Stanislav Vadimovich, Head of Laboratory*

Введение

Пассивация плёнкой диэлектрика поверхности AlGaIn/GaN является одной из ключевых операций технологии изготовления мощного НЕМТ [1]. В настоящее время наиболее часто используемым защитным покрытием для НЕМТs на основе AlGaIn/GaN является пленка SiN_x, осажденная методом PECVD, позволяющим осаждать эту пленку при сравнительно низкой температуре.

Практически во всех исследованиях осаждение защитного покрытия SiN_x методом PECVD на структуры AlGaIn/GaN для НЕМТs вели, как правило, так, чтобы минимизировать бомбардировку исходной структуры ионами из плазмы, и тем более без подачи ВЧ смещения на подложку. Поэтому влиянию предварительной обработки в плазме азота структуры AlGaIn/GaN перед осаждением защитного покрытия SiN_x методом PECVD посвящено сравнительно мало работ, выполненных в последние два десятилетия [2-8]. К сожалению, в этих работах недостаточно подробно изучено влияние бомбардировки ионами плазмы подложки перед осаждением защитного покрытия SiN_x и вызванные ею изменения свойств гетероструктур SiN_x/AlGaIn/GaN.

Практической целью работы является исследование влияния процесса осаждения диэлектрических защитных покрытий из SiN_x (PECVD) на формируемые структуры SiN_x/AlGaIn/GaN для нахождения способов регулирования их свойств и, в частности, их влияния на сдвиг С-V характеристик и изменения параметров проводящего канала.

Методика эксперимента

Осаждение пленок SiN_x проводили в установке Plasmalab System 100 ICP180 фирмы Oxford Instruments Plasma Technology. Её достоинством является наличие источника ICP, дающего возможность управления ВЧ мощностью возбуждения плазмы и независимо от этого ускорением ионов к подложке, путем подачи ВЧ смещения на подложку. Высокая скорость диссоциации в источнике ICP позволила использовать в качестве прекурсора азот вместо NH₃, что дает возможность получить пониженную концентрацию водорода в рабочей камере и, соответственно, в растущей пленке.

К источнику ICP был подключен ВЧ генератор с частотой 13,56 МГц для создания плотной плазмы с используемой ВЧ мощностью 1200 Вт. Другой ВЧ генератор той же частоты был подключен к подложкодержателю для независимой регулировки постоянного потенциала смещения подложки относительно корпуса установки. При подложке диаметром 52 мм, мощности ВЧ смещения подложки 20 Вт, потоке азота 15,8 см³/мин и давлении 1,33 Па величина этого потенциала была -92 В.

Камера установки состояла из рабочей зоны в нижней своей части и источника ICP в верхней. Камера реактора была разделена заземленным перфорированным экраном из дюралюминия, расположенным между источником ICP и подложкодержателем. Экран содержал большое количество отверстий диаметром 20 мм. Этот разделяющий экран ослаблял ионную бомбардировку подложки и увеличивал вероятность ионизации частиц моносилана ниже экрана. Подача газов SiH₄ и азота в

камеру реактора была отдельная: азот входил в камеру источника ICP, а моносилан – через распределительное кольцо, расположенное вблизи подложкодержателя, чтобы приблизить продукты разложения SiH_4 к подложке.

Потоки газов-прекурсоров для осаждения пленок SiN_x были выбраны в предыдущей работе [9] такие (азота $15,8 \text{ см}^3/\text{мин}$ и моносилана $11,2 \text{ см}^3/\text{мин}$), чтобы осаждение пленки нитрида кремния не вызывало сдвига C-V характеристик исходных гетероструктур. Рабочее давление в камере было $1,33 \text{ Па}$ и поддерживалось автоматическим изменением степени открытия вакуумного затвора. Обработку подложек в азотной плазме вели в том же режиме, только без напуска моносилана. Такое поддержание перечисленных параметров обеспечивало максимальное постоянство большинства условий проведения процесса.

В качестве подложек использовали пластины диаметром 52 мм , содержащие гетероструктуры, выращенные с помощью MOCVD эпитаксии слоев $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ на подложке сапфира и подложки из кремния. Непосредственно перед загрузкой образцов в рабочую камеру установки их подвергали струйной обработке 90 с в струе диметила, имеющей температуру $80 \text{ }^\circ\text{C}$ и формируемой под давлением 80 атм . Затем обрабатывали 30 с струей изопропилового спирта, имеющей температуру $30 \text{ }^\circ\text{C}$ с последующей сушкой в азоте. Подложки вводили в камеру через откачиваемый шлюз и прижимали к подложкодержателю сапфировым кольцом с отверстием диаметром 50 мм . Температуру подложки удерживали в диапазоне $200 \text{ }^\circ\text{C}$, используя электриче-

ский нагреватель в подложкодержателе и подачу потока гелия $10 \text{ см}^3/\text{мин}$ между подложкой и подложкодержателем.

Толщина и коэффициент преломления покрытия измерялись на контрольных кремниевых подложках с помощью эллипсометра L1165300 фирмы «Gartner» с длиной волны лазера $632,8 \text{ нм}$. Все измерения на каждом образце проводили в пяти точках. Судя по данным измерений, полученные пленки были довольно однородные по площади подложки. Разброс толщины не превышал $0,11\%$ и коэффициента преломления $0,03\%$.

C-V характеристики структур $\text{SiN}_x/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ до и после осаждения, а также после удаления пленки SiN_x , определяли с помощью измерения на установке Semiconductor Measurement System MDC CSM/Win на частотах $f = 1 \text{ МГц}$ и 10 кГц . Измерения проводились с помощью измерительного ртутного зонда, имеющего площадь $0,005 \text{ см}^2$, второй контактный зонд имел кольцевую форму и площадь в 38 раз превышающую площадь измерительного зонда. Электрические характеристики проводящего канала в структурах HEMTs (слоевое сопротивление R_s , слоевая концентрация электронов n_s и их подвижность μ_s) были измерены на установке LEI-1600 Mobility Systems, предназначенной для бесконтактных ВЧ холловских измерений. Этим методом измеряли электрические параметры канала проводимости в образцах, из которых полученные значения слоевого сопротивления канала хорошо воспроизводятся в пределах $\pm 3\%$, а существенно повышенные значения подвижности и пониженные значения концентрации элект-

ронов еще могут потребовать дополнительного уточнения и верификации.

**Результаты экспериментов с предварительной обработкой подложки AlGaIn/GaN в плазме азота перед осаждением плёнки SiN_x.
Изменения свойств проводящего канала в структурах SiN_x/AlGaIn/GaN HEMT**

В данном разделе описаны изменения свойств проводящего канала структур SiN_x/AlGaIn/GaN HEMTs, в процессе изготовления которых поверхность подложки перед осаждением плёнки нитрида кремния подвергалась обработке плазмой азота без ВЧ смещения на подложке и со смещением.

Для определения степени влияния обработки в азотной плазме без подачи смещения на подложку, на электрофизические параметры канала в структурах AlGaIn/GaN провели четыре процесса осаждения плёнки SiN_x с предварительной обработкой поверхности AlGaIn различной длительности: 25, 50, 100 и 200 с. Последующее осаждение плёнки SiN_x длительностью 150 с проводили in-situ с дополнительным напуском в камеру потока моносилана

кремния 11,2 см³/мин. Полученные результаты сведены в табл. 1 и проиллюстрированы на графиках рис.1-4. Из них видно, что исходные эпитаксиальные структуры до обработки в плазме были близки по указанным параметрам, так как они получены от одного производителя. А полученные после обработки результаты свидетельствуют о существенном влиянии длительности обработки.

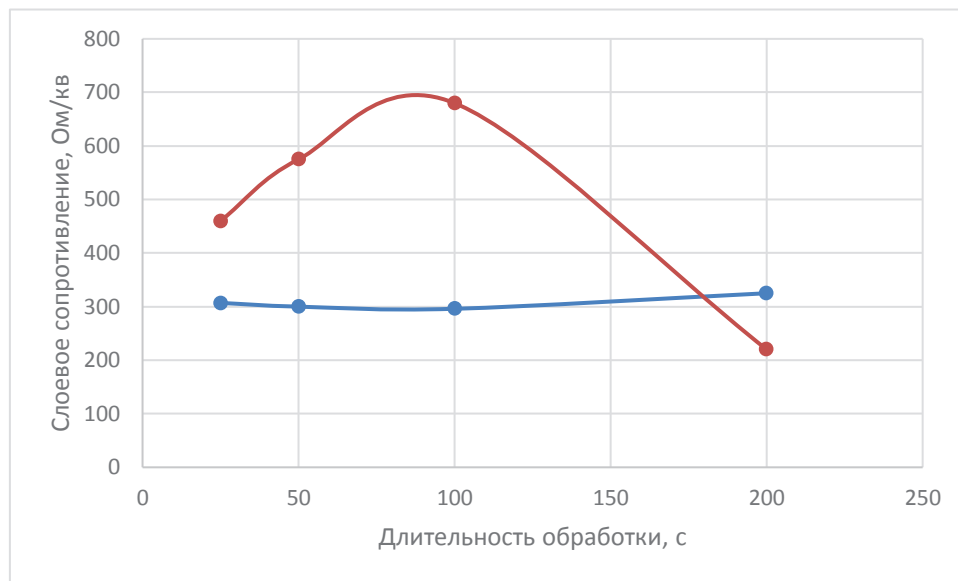
В следующем эксперименте подложка подвергалась обработке в азотной плазме в течение 180 с при подаче на подложку ВЧ смещения мощностью 20 Вт с последующим in situ осаждением плёнки нитрида кремния в режиме предыдущих экспериментов.

Рост длительности обработки в описанных условиях демонстрирует явные монотонные зависимости: подвижность электронов растёт, концентрация электронов и слоёвое сопротивление снижаются. При этом их значения стремятся к значениям, полученным после предварительной обработки поверхности подложки в плазме азота со смещением (табл. 1), то есть, и в этих образцах концентрация электронов в канале тоже снизилась, их подвижность

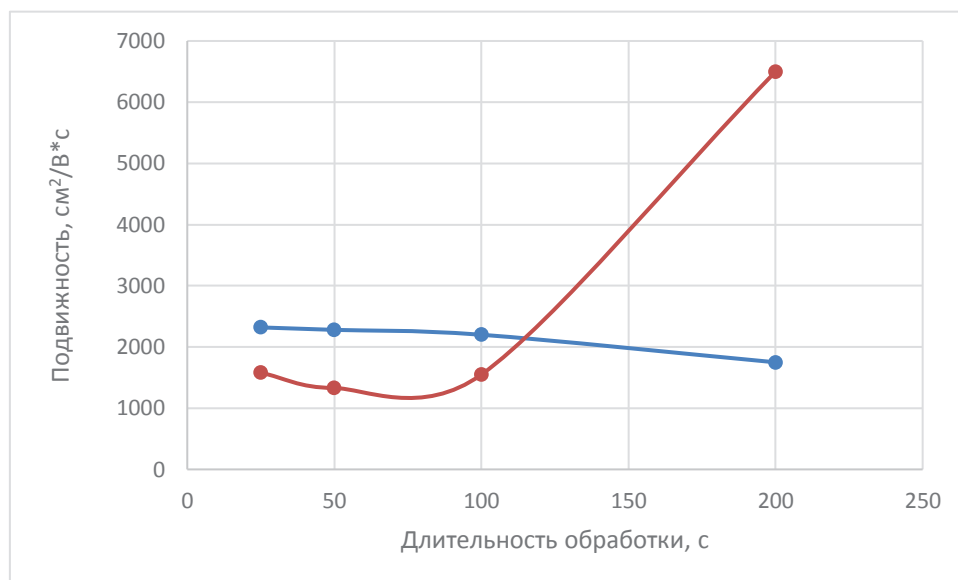
Таблица 1

Электрофизические параметры проводящего канала в структурах HEMT, исходные и после обработки образцов в плазме азота различной длительности с последующим осаждением пленки SiN_x

ВЧ смещение 20 Вт	Длительность обработки, с	Исходные значения			После обработки и осаждения пленки			
		R _s , Ом/кв	n _s *10 ⁻¹² , см ⁻²	μ _s , см ² /В*с	R _s , Ом/кв	n _s *10 ⁻¹² , см ⁻²	μ _s , см ² /В*с	Сдвиг напряжения отсечки, В
Выкл.	25	307	9,4	2320	460	8,8	1580	+0,3
Выкл.	50	300	9,4	2280	575	8,3	1340	+0,3
Выкл.	100	296	9,8	2200	680	5	1750	+2,1
Выкл.	200	325	11	1750	220	4,5	6500	+4,8
Вкл.	180	323	10,2	1900	200	2,1	16100	+7

**Рис.1.**

Величина слоевого сопротивления канала структур AlGaIn/GaN в зависимости от времени предварительной обработки подложки в азотной плазме:
синяя линия – начальные значения для образцов,
красная линия – значения после обработки

**Рис.2.**

Величина подвижности электронов в канале структур AlGaIn/GaN в зависимости от времени предварительной обработки подложки в азотной плазме:
синяя линия – начальные значения для образцов,
красная линия – значения после обработки

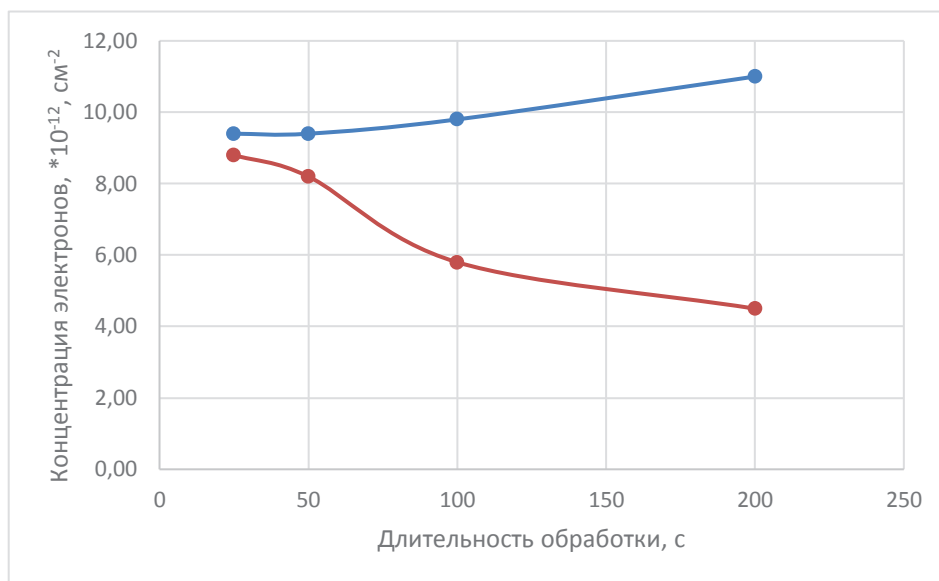


Рис.3.

Величина концентрации электронов в канале структур AlGaIn/GaN в зависимости от времени предварительной обработки подложки в азотной плазме: синяя линия – начальные значения для образцов, красная линия – значения после обработки

возросла, но в большей степени, чем при обработке в плазме без смещения. После осаждения со смещением слоевое сопротивление канала уменьшилось в 1,6 раза с 323 до 200 Ом/кв за счет резкого увеличения подвижности электронов μ_s почти на порядок с $1,9 \cdot 10^3$ см²/В*с до $16,1 \cdot 10^3$ см²/В*с, с одновременным почти пятикратным падением концентрации электронов n_s с $10,2 \cdot 10^{12}$ см⁻² до $2,1 \cdot 10^{12}$ см⁻² (табл. 1). Итак, подача даже сравнительно небольшого смещения во время обработки подложки существенно усиливает результаты воздействия ионов на свойства канала структуры НЕМТ по сравнению с обработкой без смещения.

Из данных табл. 1 и построенных на их основе графиков (рис.1-4) следует несколько парадоксальный результат: зависимость

слоевого сопротивления канала от времени обработки не монотонная. При сравнительно малой длительности обработки (менее примерно 100 с) происходит значительный рост слоевого сопротивления, пропорциональный времени обработки. Происходит это в основном за счет падения концентрации электронов в канале, при этом их подвижность изменялась в сравнительно небольших пределах.

При длительности обработки 100 с слоевое сопротивление достигает максимума и далее начинает уменьшаться, при длительности обработки 200 с слоевое сопротивление становится даже ниже исходного. Одновременно по сравнению с исходными значениями концентрация электронов в канале снизилась в 2,4 раза, а подвижность увеличилась в 3,7 раза.

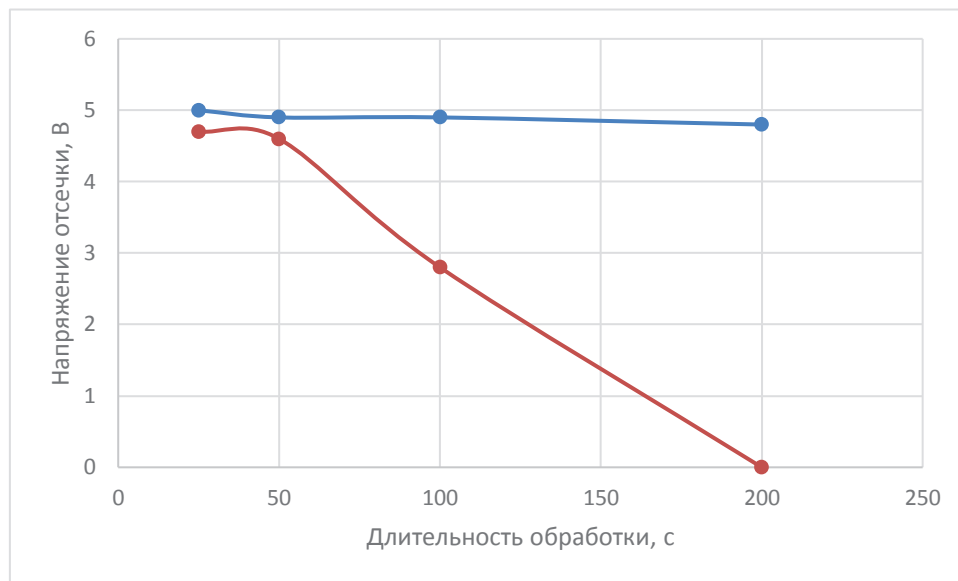


Рис.4.

Величина отрицательного порогового напряжения при измерении C-V характеристик структур AlGaIn/GaN до и после осаждения пленки SiN_x в зависимости от времени предварительной обработки подложки в азотной плазме без подачи смещения:

синяя линия – начальные значения для образцов,

красная линия – значения после обработки

Сдвиг C-V характеристик HEMTs структур

Во всех экспериментах предварительная обработка поверхности структур AlGaIn/GaN в азотной плазме не повлияла на параметры (толщины и коэффициента преломления) осажденных затем пленок SiN_x. Как и ожидалось, при длительности осаждения 150 с толщина полученных пленок была 1000 Å и их коэффициент преломления 1,73-1,79.

Как и для других параметров структур AlGaIn/GaN величины сдвига C-V характеристик отличалось при малых длительностях обработки и при больших. При малых длительностях обработки (менее 50 с) сдвиг был слабо положительный +0,3 В (рис.4), т.е., положение C-V характеристик практически не изменялось.

В свою очередь при больших длительностях обработки сдвиг был существенно

более положительный +2,1 В после 100 с и даже +4,8 В после обработки 200 с (рис.4), т.е. при обработке положение C-V характеристик сдвигалось в сторону положительных напряжений и тем больше, чем длительней была обработка.

Эта тенденция со сдвигом C-V характеристик в сторону положительных напряжений усиливается, если предварительную обработку образца вели с подачей ВЧ смещения на подложку. Действительно, это дало после нанесения пленки сдвиг порогового напряжения примерно на +7 В. Эта величина больше, чем у образцов, полученных без смещения, т.е. и здесь при увеличении длительности обработки без смещения результат стремится к результату, полученному при обработке со смещением.

Итак, во всех случаях предварительной обработки в плазме азота со смещением и без него имел место сдвиг C-V характери-

стик в сторону положительных напряжений. Причем более сильный эффект (+7 В) был у образца, предварительно обработанного азотной плазмой с ВЧ смещением на подложке, чем без подачи смещения.

Отметим, что полученный в данной работе сдвиг C-V характеристик в сторону положительных напряжений является, можно сказать, рекордным по величине и благоприятным для улучшения параметров изготавливаемых транзисторов [15].

Характеристики структур SiN_x/AlGaIn/GaN после удаления с них защитной плёнки SiN_x

Предварительная обработка структур AlGaIn/GaN в азотной плазме перед осаждением пленки SiN_x, как показано выше, вызывает существенные изменения свойств слоя AlGaIn. Для более детального рассмотрения измененных свойств слоя AlGaIn с части поверхности полученных структур SiN_x/AlGaIn/GaN плёнка SiN_x была удалена травлением в плавиковой кислоте. Это дало возможность непосредственно на поверхности структуры AlGaIn/GaN измерить их C-V характеристики, объемную плотность электронов в канале и распределение концентрации электронов в канале по толщине образца.

Положение C-V характеристик структур после удаления с их поверхности плёнок SiN_x изменилось. Произошел их сдвиг в положительную сторону на 1,9 В в образце после обработки в плазме 25 с, на 2,9 В после обработки 50 с и на 1,5 В после обработки 100 с. Причём величина этого сдвига была больше, чем после обработки в плазме и нанесения плёнки SiN_x (табл. 1). Что говорит о значительном уменьшении плотности положительного поверхностного заряда на поверхности слоя AlGaIn. Воз-

можно, это связано с изменением структуры поверхности слоя AlGaIn в результате обработки в плазме, осаждения и удаления пленки SiN_x с этой поверхности. Что привело к уменьшению плотности ионизированных донорно-подобных ловушечных центров (состояний), содержащих положительный заряд.

Объемная концентрация электронов в канале после удаления плёнки SiN_x, оценённая по C-V характеристикам, монотонно снижалась с ростом длительности обработки: $7,2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ после обработки 25 с, $4 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ после обработки 50 с и $2,5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ после обработки 100 с. Она снижалась также, как и слоевая концентрация электронов в канале образцов до снятия плёнки нитрида кремния (график на рис.3 и табл. 1). Таким образом, зависимости от длительности обработки объемной и слоевой концентраций электронов аналогичны и пропорциональны друг другу.

Из полученных C-V характеристик образцов, с которых удалили плёнку SiN_x, была вычислена глубина нахождения проводящего канала, равная толщине слоя AlGaIn после обработки, длительностью 25, 50 и 100 с. У всех образцов она была равна его исходной толщине 25 нм. То есть, при обработке в азотной плазме без подачи смещения травление слоя AlGaIn не наблюдалось.

В отличие от этого при большой длительности обработки 200 с измерения C-V характеристик провести не удалось. Объясняется это тем, что при росте длительности обработки, напряжения отсечки сдвигались в сторону положительных значений и после обработки 200 с стали положительными, что явилось ограничением для используемого измерительного оборудования.

Эксперименты по измерению параметров проводящего канала на установке ВЧ бесконтактных измерений показал, что после удаления защитной плёнки параметры проводящего канала практически не изменились, и остались такими же как было указано в табл. 1. Этого можно было ожидать, так как еще в предыдущей нашей работе [9] было показано, что в плёнках нитрида кремния, осажденных в выбранном там режиме и используемом в данной работе, механические напряжения в плёнке минимальны, поэтому наличие или отсутствие такой плёнки практически не сказывается на свойствах НЕМТ структур. Поэтому все наблюдаемые нами изменения свойств НЕМТ структур вызваны именно предварительной обработкой в плазме азота.

Этот вывод подтверждается экспериментом, в котором повторили один из четырех вышеописанных процессов с обработкой в течение 200 с, а измерения параметров проводящего канала и C-V характеристик структур AlGaIn/GaN осуществляли непосредственно после обработки в плазме азота. Для этого потребовался вынос образца из вакуумной камеры до осаждения плёнки SiN_x. Измерения непосредственно после обработки, также, как и последующего через месяц осаждения плёнки, показали, что результаты этого процесса совпали с результатами процесса осаждения, выполненного in-situ. Это дает основания утверждать, что положительный сдвиг C-V характеристик и изменения параметров проводящего канала произошли в результате обработки в плазме, а не под влиянием осаждения плёнки SiN_x. Кроме того, этот эксперимент показал, что плёнка естественного окисла на поверхности AlGaIn, образовавшаяся за период между обработ-

кой и осаждением, не повлияла на электрические характеристики НЕМТ структур.

Обсуждение результатов воздействия ионов на подложку AlGaIn/GaN при предварительной ее обработке в плазме азота (краткий обзор)

Плазма в рабочей камере, как правило, имеет положительный потенциал относительно стенок, который по некоторым оценкам [4,10] составляет от 10 до 40 В. И такой же потенциал она имеет относительно подложки, если на подложку не подано смещение от внешнего источника питания, и тогда потенциал ее поверхности равен потенциалу стенок камеры (нулю). Поэтому из плазмы даже без подачи ВЧ смещения на подложку идет поток бомбардирующих ее электронов, положительных ионов азота (N⁺², N⁺, N₂⁺), водорода и состоящих из них радикалов), а также атомарного азота (N) и возбужденных нейтральных частиц N и N₂. Приносимой ими энергии достаточно для активации химических процессов, диссоциации соединений, десорбции летучих молекул с поверхности подложки (слоя AlGaIn) [10]. Вместе с тем, она ниже пороговой энергии, необходимой для ионного распыления материала подложки.

Необходимую для процесса распыления более высокую энергию положительных ионов можно обеспечить, подавая на подложку ВЧ смещение, создающее существенный постоянный отрицательный потенциал смещения на ее поверхности. Так при подаче ВЧ мощности 20 Вт на подложку ее потенциал относительно корпуса установки составлял, как уже отмечалось -92 В. Для сравнения – в работе [11] постоянный потенциал смещения подложки достигал от -100 В до -130 В, в то время как подводимые ВЧ мощности составляли –

400 Вт к индуктивной катушке возбуждения и 40 Вт к подложке. Сопоставление несколько условное, поскольку оборудование и условия процесса различны.

Отличие режимов осаждения со смещением и без него заключается в величине потенциала подложки относительно корпуса установки и, соответственно, в энергии бомбардирующих подложку ионов, которая определяется суммой абсолютных величин потенциалов плазмы и подложки относительно корпуса установки. Таким образом, оба режима осаждения, без смещения и со смещением, принципиально похожи.

При создании с помощью источника ICP в рабочей камере установки азотной плазмы осаждение пленки в отсутствие моносилана не происходит. При этом подложка AlGaIn/GaN подвергается бомбардировке, главным образом, ионами азота, которая усиливается при применении ВЧ смещения подложки, и тогда могут иметь место следующие явления [4, 10]:

1) преимущественное удаление атомов азота и/или внедрение их из плазмы, из-за чего имеет место изменение плотности точечных дефектов, работающих как ловушки для носителей зарядов на поверхности AlGaIn;

2) смещение атомов алюминия и галлия в промежуточные состояния, то есть формирование точечных дефектов в монокристаллической структуре слоя AlGaIn;

3) распыление атомов элементов из слоя AlGaIn, неодинаковое для этих трёх элементов, имеющих различные коэффициенты распыления;

4) утонение слоя AlGaIn из-за его ионного распыления.

Плазму азота и ранее использовали для создания азотно-дефицитных приповерхностных областей в структурах транзи-

сторов AlGaIn/GaN [12]. В ней наблюдали преимущественную потерю азота из приповерхностной (~10 нм) области AlGaIn. Например, предпринятый авторами [12] оже-анализ поверхности образца после обработки в плазме показал, что средняя концентрация азота у поверхностного слоя толщины 10 нм снизилась с 10% до 7,1%.

Далее будут подробнее обсуждены механизмы влияния предварительной обработки подложки в азотной плазме на свойства получаемых HEMTs структур SiN_x/AlGaIn/GaN.

Механизмы влияния предварительной обработки подложки в азотной плазме на свойства HEMTs структур

Как было описано в предыдущих разделах, имеет место интенсивное воздействие ионов из плазмы азота на поверхность подложки AlGaIn/GaN. О нем можно судить по экспериментально полученным изменениям свойства HEMTs структур SiN_x/AlGaIn/GaN (табл. 1). Экспериментальные данные, указанные в таблице, позволили, как мы видели выше, сравнить результаты процессов осаждения плёнок с предварительной обработкой различной длительности в плазме азота с подачей на подложку ВЧ смещения и без него. При обработке происходит уменьшение концентрации электронов в канале и рост их подвижности. Причем при малых длительностях обработки ее влияние на свойства канала не велико. Но при увеличении длительности обработки, как мы видели (табл. 1), результаты обработки без смещения становятся более существенными, они стремятся к результатам, полученным при обработке со смещением. Иными словами, воздействия на слой AlGaIn в обоих случаях сходны и отличаются только

степенью воздействия из-за различия в плотности потоков и энергий бомбардирующих подложку ионов азота из плазмы.

Полученные нами результаты хорошо согласуются также с результатами работы [3], где было показано, что при предварительной обработке поверхности слоя AlGaN в плазме азота значение слоевого сопротивления канала быстро увеличивается с увеличением мощности ВЧ смещения. Если образец подвергался воздействию плазмы самой низкой мощности (60 Вт), то активные радикалы азота в плазме уже способны вступать в реакцию с примесями на поверхности (такими как углерод и кислород [3, 13], что демонстрировало эффект очистки поверхности. А их взаимодействие с избыточными атомами Ga приводило к восстановлению стехиометрии поверхности [16]. Это согласуется с уменьшением плотности поверхностных состояний (азотных вакансий). В этом случае плёнка SiN_x может более эффективно пассивировать поверхность AlGaN с помощью предварительной плазменной обработки в азоте при низкой мощности смещения. Напротив, при применении высокой мощности смещения ионная бомбардировка поверхности энергичными ионами во время предварительной обработки плазмы становится доминирующим механизмом, приводящим к изменению нейтральности заряда на поверхности AlGaN [3,6].

Объяснить результаты описанных экспериментов можно действием нескольких возможных одновременно действующих механизмов, связанных с воздействием бомбардировки ионами азота на эпитаксиальный слой AlGaN.

Во-первых, воздействие ионной бомбардировки на эпитаксиальный слой AlGaN начинается с изменения структуры

поверхности этого слоя. На границе раздела SiN_x/AlGaN изменяется количество точечных дефектов [10, 12, 16], действующих как ионизированные донорно-подобные ловушечные центры, которые содержат положительный заряд. Обработка ионами азота улучшает качество поверхности AlGaN путем заполнения вакансий азота, чем уменьшает количество оборванных связей [16]. Эти поверхностные дефекты и находящиеся на них заряды существенно влияют на положение C-V характеристик структур SiN_x/AlGaN/GaN. Но вызванные этими зарядами изменения свойств проводящего канала происходят в небольших пределах.

Во-вторых, воздействие бомбардировки ионов сказывается уже в самом слое AlGaN. Действительно, толщина слоя AlGaN примерно 25 нм, а воздействие ионов может простирается до 10-50 нм [10, 14]. Например, при обработке решающую роль играет, возможно, изменение состава этого слоя, в котором может изменяться соотношение атомов металлов и азота. Кроме того, при обработке в плазме с ВЧ смещением на подложке возможно изменение состава этого слоя, в котором может изменяться соотношение концентраций атомов Al и Ga из-за различия их коэффициентов распыления. В результате большое влияние имеет насыщение точечными дефектами слоя AlGaN. Это атомы элементов слоя, удалённые или смещённые из равновесных положений под ударами ионов из плазмы, а также внедрённые дополнительные атомы азота. Чем больше длительность обработки или ее интенсивность, тем больше концентрация точечных дефектов.

При насыщении дефектами монокристаллического слоя AlGaN изменяются действующие в нем механические напря-

жения и его пьезокристаллические свойства. Поскольку канал проводимости в структурах AlGaIn/GaN образуется благодаря пьезоэлектрической поляризации в слое AlGaIn, то изменения в слое AlGaIn определяют изменения параметров канала. Из-за действия перечисленных механизмов падает концентрация электронов в канале и растет их подвижность (см. графики на рис.2 и 3). Последнее происходит из-за уменьшения взаимных столкновений электронов и их рассеяния [1]. В результате слои сопротивление канала меняется не монотонно (рис.1) – увеличивается при малой длительности обработки и уменьшается при длительной, и особенно существенно уменьшается, если обработка в плазме велась с подачей ВЧ смещения.

Итак, можно отметить общие закономерности, имеющие место после предварительной обработки подложки AlGaIn/GaN в плазме азота с ВЧ смещением или достаточно длительной без него – уменьшение концентрации электронов в канале и рекордное увеличение их подвижности. Ранее такие полученные величины подвижности в канале структур AlGaIn/GaN наблюдались только при пониженных температурах [7]. Такой рост проводимости приводит к уменьшению слои сопротивления до величины даже ниже исходной. Этому могут быть следующие причины – изменение состава и насыщение точечными дефектами слоя AlGaIn под действием бомбардировки ионами азота. Указанные воздействия на слой AlGaIn практически необратимы, поэтому удаление осажденной защитной пленки или отжиг структур при 500 °C не возвращают параметры канала к исходным величинам.

Выводы

Обработка поверхности исходных структур AlGaIn/GaN в азотной плазме без подачи ВЧ смещения на подложку непосредственно перед осаждением на них защитной пленки SiN_x существенно влияет на положение C-V характеристик структур HEMTs, сдвигая их от исходной величины напряжения отсечки (около -5 В) в сторону положительных значений напряжения, что позволяет достичь нулевого и даже положительного напряжения отсечки.

Одновременно такая обработка влияет на структуру слоя AlGaIn, что в свою очередь изменяет параметры проводящего канала, в частности, его слои сопротивление, концентрацию и подвижность электронов. Можно отметить общие закономерности при предварительной обработке в плазме азота: уменьшение концентрации электронов в канале, сопровождающиеся увеличением их подвижности. При этом слои сопротивление канала меняется не монотонно с ростом длительности обработки – сначала увеличивается, а затем уменьшается. Это дает возможность получить слои сопротивление канала проводимости даже ниже исходного, что важно для практических применений.

Процессы обработки поверхности структур AlGaIn/GaN в плазме азота, но с ВЧ смещением на подложке, влияли таким же образом, но существенно сильнее, чем в процессах обработки без смещения.

Таким образом, процессы осаждения с использованием предварительной обработки в плазме азота вызывают необратимые изменения свойств слоя AlGaIn и, соответственно, свойств проводящего канала HEMTs структур. При этом они предоставляют возможность регулировать свойства

исходных НЕМТs структур в желаемую сторону, в частности снижая слои сопротивление канала, что представляет собой практическое значение результатов

данной работы. То есть, это дает возможность корректировать в нужную сторону свойства эпитаксиальных НЕМТs структур уже после их изготовления.

Литература

1. Куэй Р. Электроника на основе нитрида галлия / Р. Куэй. – М.: Техносфера, 2011, 587 с.
2. Romero M. F. et al. Effects of N₂ Plasma Pretreatment on the SiN Passivation of AlGa_N/Ga_N HEMT. IEEE Electron Device Letters, 2008, vol. 29, no. 3, pp. 209-211.
3. Romero M. F. et al. Impact of N₂ Plasma Power Discharge on AlGa_N/Ga_N HEMT Performance. IEEE Transactions on Electron Devices, 2012, vol. 59, no.2, pp. 374-379.
4. Meunier R. Optimization of the elaboration of insulating layers for the gate structures and the passivation of MIS-HEMT transistors on Ga_N. Thesis. Universite Paul Sabatier-Toulouse III, 2016, English.
5. Linkohr S. et al. Influence of plasma treatments on the properties of Ga_N/AlGa_N/Ga_N HEMT structures. Physica Status Solidi (c), 2012, vol. 9, no. 3-4, pp. 1096-1098.
6. Pletschen W. et al. Changes of electronic properties of AlGa_N/Ga_N HEMTs by surface treatment. MRS Online Proceedings Library (OPL), 2014, vol. 1736.
7. Jayanta Joglekar S. Surface and mechanical stress effects in AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistors. Thesis. Massachusetts Institute of Technology, Department of Materials Science and Engineering, 2017.
8. Dong Z. et al. Impact of N-plasma treatment on the Current collapse of ALGAN/GAN HEMTs. 2014 12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT). – IEEE, 2014, pp. 1-3.
9. Сейдман, Л.А. Пленки SiN_x, полученные методом PECVD, в качестве пассивации AlGa_N/Ga_N HEMT / Л.А.Сейдман, Ю.А. Концевой, К.Л. Енишерлова, С.В.Миннебаев // Электронная техника. Сер.2. Полупроводниковые приборы. – 2020. – №. 3 (258).– С. 22-33.
10. Берлин, Е. Индуктивные источники высокоплотной плазмы и их технологические применения / Е. Берлин, В. Григорьев, Л. Сейдман – М.: Техносфера, 2019, 462 с.
11. Meyer D. J., Flemish J. R., Redwing J. M. Plasma surface pretreatment effects on silicon nitride passivation of AlGa_N/Ga_N HEMTs. Proc. CS MAN-TECH Conference, 2007, pp. 305-307.
12. Zhang A. P. et al. Effect of N₂ discharge treatment on AlGa_N/Ga_N high electron mobility transistor ohmic contacts using inductively coupled plasma. Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films, 2000, vol. 18, issue 4, pp. 1149-1152.
13. Kim J. H. et al. Effects of nitride-based plasma pretreatment prior to SiN_x passivation in AlGa_N/Ga_N High-Electron-Mobility Transistors on silicon substrates. Japanese Journal of Applied Physics, 2010, vol. 49, no. 4S, p. 04DF05.
14. Cao X. A. et al. Depth and thermal stability of dry etch damage in Ga_N Schottky diodes. Applied Physics Letters, 1999, vol. 75, issue 2, pp. 232-234.
15. Matys M. et al. Origin of positive fixed charge at insulator/AlGa_N interfaces and its control by AlGa_N composition. Applied Physics Letters, 2017, vol. 110, issue 24, pp. 243505.
16. Liu S. C. et al. Ga_N MIS-HEMTs with nitrogen passivation for power device applications. IEEE Electron Device Letters, 2014, vol. 35, no. 10, pp. 1001-1003.

References

1. Quay R. Elektronika na osnove nitride galliya [Gallium nitride electronics]. Moscow, Tekhnosfera, 2011, 587 p.

2. Romero M. F. et al. Effects of N₂ plasma pretreatment on the SiN passivation of AlGaIn/GaN HEMT. *IEEE Electron Device Letters*, 2008, vol. 29, no. 3, pp. 209-211.
3. Romero M. F. et al. Impact of N₂ plasma power discharge on AlGaIn/GaN HEMT performance. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, vol. 59, no. 2, pp. 374-379.
4. Meunier R. Optimization of the elaboration of insulating layers for the gate structures and the passivation of MIS-HEMT transistors on GaN. Thesis, Universite Paul Sabatier-Toulouse III, 2016.
5. Linkohr S. et al. Influence of plasma treatments on the properties of GaN/AlGaIn/GaN HEMT structures. *Physica Status Solidi (c)*, 2012, vol. 9, no. 3-4, pp. 1096-1098.
6. Pletschen W. et al. Changes of electronic properties of AlGaIn/GaN HEMTs by surface treatment. *MRS Online Proceedings Library (OPL)*, 2014, vol. 1736.
7. Jayanta Joglekar S. Surface and mechanical stress effects in AlGaIn/GaN high electron mobility transistors. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Department of Materials Science and Engineering, 2017.
8. Dong Z. et al. Impact of N-plasma treatment on the current collapse of AlGaIn/GaN HEMTs. 12th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT), IEEE, 2014, pp. 1-3.
9. Seydman L. A., Kontsevoy Yu. A., Enisherlova K. L., Minnebaev S. V. PECVD obtained SiN_x films for the passivation of AlGaIn/GaN HEMT. *Electronic Engineering. Series 2. Semiconductor Devices*, 2020, no. 3(258), pp. 22-33.
10. Berlin E., Grigoryev V., Seydman L. Sloi Si₃N₄ dlya in situ passivatsii tranzistornykh struktur na osnove GaN [Inductive sources of high-density plasma and their applications]. *Tekhnosfera*, 2019, 462 p.
11. Meyer D. J., Flemish J. R., Redwing J. M. Plasma surface pretreatment effects on silicon nitride passivation of AlGaIn/GaN HEMTs. *Proc. CS MAN-TECH Conference*, 2007, pp. 305-307.
12. Zhang A. P. et al. Effect of N₂ discharge treatment on AlGaIn/GaN high electron mobility transistor ohmic contacts using inductively coupled plasma. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 2000, vol. 18, iss. 4, pp. 1149-1152.
13. Kim J. H. et al. Effects of nitride-based plasma pretreatment prior to SiN_x passivation in AlGaIn/GaN High-Electron-Mobility Transistors on silicon substrates. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2010, vol. 49, no. 4S, p. 04DF05.
14. Cao X. A. et al. Depth and thermal stability of dry etch damage in GaN Schottky diodes. *Applied Physics Letters*, 1999, vol. 75, iss. 2, pp. 232-234.
15. Matys M. et al. Origin of positive fixed charge at insulator/AlGaIn interfaces and its control by AlGaIn composition. *Applied Physics Letters*, 2017, vol. 110, iss. 24, pp. 243505.
16. Liu S. C. et al. GaN MIS-HEMTs with nitrogen passivation for power device applications. *IEEE Electron Device Letters*, 2014, vol. 35, no. 10, pp. 1001-1003.